
Fluage et retrait d'un Béton à Hautes Performances en conditions hydriques variables

Cagnon H.

Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions) ; 135, avenue de Rangueil ; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. Le présent article porte sur les variations dimensionnelles des Bétons Hautes Performances (BHP) soumis à des variations hydriques avec ou sans chargement. Lorsqu'un BHP a été séché avant chargement son amplitude de fluage en dessiccation est réduite par rapport à celle d'un BHP n'ayant pas été préalablement séché. Si lors de l'essai de fluage, le BHP est soumis à des cycles hydriques, l'histoire de séchage avant chargement semble s'effacer. En effet, les éprouvettes préalablement séchées et soumises à des variations hydriques sous charge présentent, après deux cycles de réhumidification, la même amplitude de déformation que celles qui n'ont pas été séchées avant chargement. De plus, les déformations pendant les cycles hydriques des deux types d'éprouvette sont réversibles, avec des différences d'amplitude qui s'amenuisent au fur et à mesure que l'on réalise les cycles d'humidification/séchage.

ABSTRACT. The present paper deals with the dimensional variations of High Performance Concretes (HPC) subjected to water exchanges, with or without mechanical loading. When HPC is dried before loading, its drying creep amplitude decreases in comparison with HPC undried before loading. If concrete is subjected to hydric cycles, these hydric variations lead to a progressive erasing of history before loading. Indeed, the samples dried before loading and subjected to hydric cycles under load, have the same deformation amplitude compared to those undried before loading. Moreover, the deformation during hydric cycles of the two different tests is reversible, with a decreasing of the difference in amplitude with the accumulation of cycles.

MOTS-CLÉS : un maximum de six mots significatifs : fluage, retrait, cycles hydriques

KEY WORDS: a maximum of six significant words: creep, shrinkage, hydric cycles

1. Introduction

Cette étude a été conduite dans le contexte du futur stockage des déchets radioactifs Moyenne Activité Vie Longue (MA-VL) de l'Andra. Pendant la durée de service, les structures seront soumises à des conditions environnementales particulières, notamment à des variations hydriques et thermiques couplées à un chargement mécanique. Les couplages thermo-mécaniques ont fait l'objet d'études récentes menées dans le cadre de ce même projet [LAD 11, LAD 13]. En ce qui concerne l'aspect hydrique, le comportement mécanique à long terme du béton sous conditions hydriques variables reste encore mal connu. En effet, la majorité des études concernent le fluage de dessiccation sous humidité relative constante. Lorsque le béton est soumis à du séchage et une charge mécanique maintenue dans le temps, la déformation résultante est plus importante que l'addition du fluage propre et du retrait total [PIC 42, WIT 80]. Cette déformation supplémentaire appelée le fluage de dessiccation ou l'effet Pickhett, existe uniquement si le séchage est couplé au chargement mécanique. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer l'origine du fluage de dessiccation, comme par exemple un phénomène de microfissuration ou le phénomène de « stress-induced shrinkage » [HER 69, PIH 74, BAZ 75, BAZ 78, BAZ 94, BAZ 95, ACK 01, BUR 05]. Mais ces explications n'intègrent généralement pas de discussion sur l'unicité et la réversibilité des phénomènes dans le cas de variations hydriques et de cycles séchage/humidification. Or, dans de nombreuses structures, le béton peut être sujet à ce type de conditions hydriques couplées à des chargements à long terme. Les rares études portant sur le comportement du béton sous cycles hydriques [BAZ 72, BAZ 73, BAZ 74, TOR 11] concluent que le gonflement du béton dû à une réhumidification est possible sans charge. En revanche, le comportement du béton soumis à des cycles hydriques sous charge demeure peu étudié.

Le programme expérimental réalisé a été développé dans le but d'approfondir les connaissances du comportement de retrait et de fluage des bétons sous cycles hydriques. Pour cela, des éprouvettes non chargées, sont soumises à une humidité relative constante et d'autres à une humidité variable. D'autres échantillons sont chargés et soumis à des cycles hydriques identiques, après avoir subi ou non, préalablement au chargement, un

retrait en dessiccation. Les cycles hydriques sont réalisés à 20°C et pour des humidités relatives externes comprises entre 50% et 98%.

2. Programme réalisé

Six différentes configurations d'essais sont mises en place et chacune d'entre elles permet d'obtenir une part spécifique de la déformation différée totale, soit par mesure directe, soit par combinaison de plusieurs résultats. Les premières lettres correspondent aux conditions de chargement : U pour Unloaded, c'est-à-dire non chargée, SL pour Simultaneous Loaded, à savoir chargement simultané avec le début du séchage, et DL pour Delayed Loading qui fait référence au séchage qui débute avant le chargement. Les dernières lettres donnent les conditions de conservation des éprouvettes : A pour Autogenous, éprouvettes conservées en endogène, CD pour Constant Drying, séchage à humidité constante égale à 50%HR, et VD pour Variable Drying, entre 98%HR et 50%HR, correspondant au séchage à hygrométrie variable.

Après démoulage à 24h, les éprouvettes sont maintenues en cure sous eau pendant environ 3 mois. Les déformations sont également enregistrées pendant cette phase. L'analyse éventuellement croisée des résultats des différentes configurations d'essais peut être synthétisée de la manière suivante :

- Les éprouvettes non chargées en dessiccation (UCD) ou en endogène (UA) permettent d'obtenir respectivement le retrait en dessiccation et le retrait endogène.
- Les éprouvettes non chargées à séchage variable (UVD) permettent de mesurer la déformation libre sous cycles hydriques.
- Les éprouvettes chargées simultanément avec le séchage constant (SLCD) ou en endogène (SLA) permettent d'obtenir le fluage en endogène et le fluage en dessiccation à hygrométrie constante.
- Les éprouvettes chargées simultanément avec le séchage variable (SLVD) permettent de quantifier les variations de déformations sous charge dues aux variations hydriques.
- Les éprouvettes chargées après 43 jours de séchage à hygrométrie constante (DLCD) ou après 43 jours de retrait en endogène (DLA) permettent d'estimer l'influence du retrait avant chargement sur les déformations sous charge ultérieures et à hygrométrie constante.
- Les éprouvettes chargées après 43 jours de séchage à hygrométrie variable (DLVD) puis soumises à deux cycles hydriques d'humidification et de séchage sont mises en place dans le but d'être comparées à celles qui n'ont pas subi de séchage préalable au chargement.

3. Matériel utilisé

Le système permettant de mettre des éprouvettes sous charge à 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) et hygrométrie constante égale à 50%HR ($\pm 5\%$) est présenté dans la Figure 1.

Ce dispositif expérimental permet de réaliser le programme suivant :

- Eprouvettes chargées simultanément avec le séchage à hygrométrie constante (SLCD) ou en endogène (SLA)
- Eprouvettes chargées après 43 jours de séchage à hygrométrie constante (DLCD) ou après 43 jours de retrait en endogène (DLA)

Le chargement uniaxial en compression est appliqué grâce à un vérin relié à une pompe hydraulique. Les éprouvettes placées en partie supérieure du bâti de fluage permettent d'obtenir le fluage propre et les éprouvettes en partie inférieure le fluage en dessiccation. Les retraits en endogène et en dessiccation sont mesurés à l'aide d'un rétractomètre. Ces déformations correspondent aux éprouvettes non chargées en endogène (UA) et aux éprouvettes non chargées en séchage constant (UCD).

Le dispositif mis en place pour mesurer les déformations sous variations hydriques est sensiblement le même. Chaque bâti de fluage est indépendant et placé dans une enceinte climatique réglable en température et hygrométrie. La mise en charge est également réalisée par l'intermédiaire d'une pompe manuelle via un système hydraulique relié au bâti et positionné hors de la chambre climatique. Ce système est équipé d'accumulateurs d'azote qui ont pour objectif de maintenir la pression des vérins constante pendant la durée des essais (Figure 2 et Figure 3).

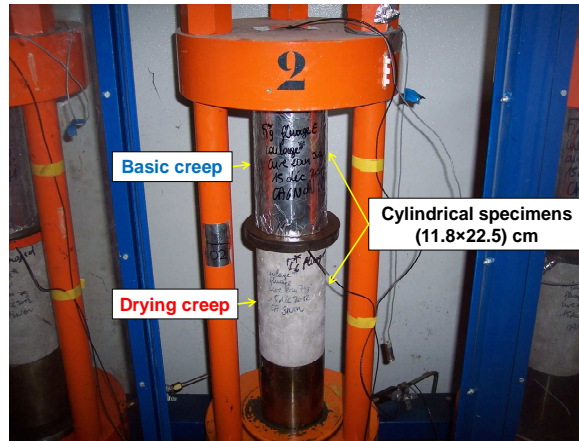


Figure 1. Bâti de fluage à 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) et 50%HR ($\pm 5\%$)

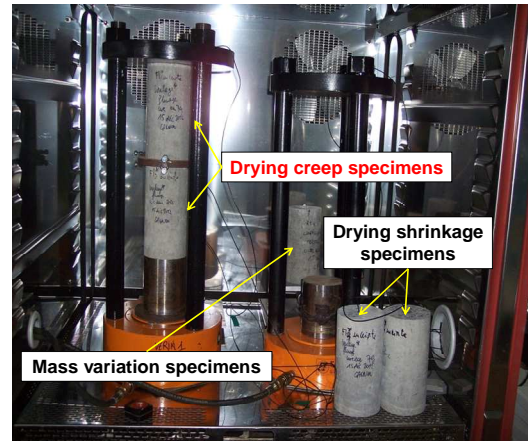


Figure 2. Dispositif expérimental pour le fluage en dessiccation à hygrométrie variable-20°C-50%HR-98%HR

Les mesures réalisées dans l'enceinte climatique sont les suivantes :

- Eproutettes non chargées à séchage variable (UVD)
- Eproutettes chargées simultanément avec le séchage variable (SLVD)
- Eproutettes chargées après 43 jours de séchage à hygrométrie variable (DLVD) puis soumises à deux cycles hydriques

L'enceinte climatique est réglable et contrôlée depuis l'extérieur, comme présenté dans la Figure 3.

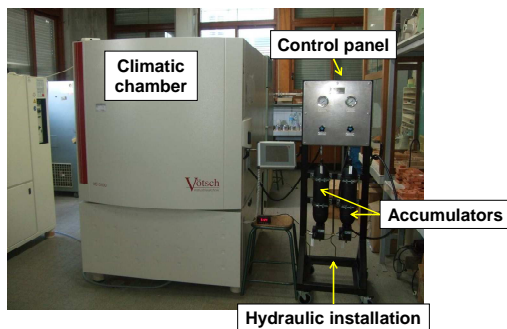


Figure 3. Enceinte climatique et dispositif de mise en pression des bâtis de fluage à hygrométrie

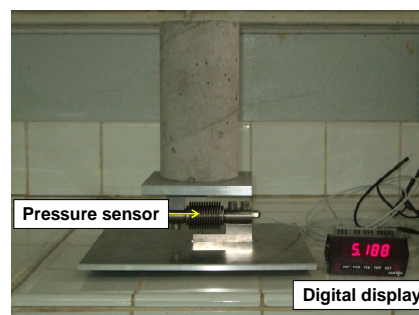


Figure 4. Dispositif de mesure de perte de masse des éproutettes de retrait en dessiccation à hygrométrie variable

Pour les éproutettes de retrait conservées dans l'enceinte climatique, le dispositif de suivi de variations massiques permet de relever les valeurs depuis l'extérieur de l'enceinte climatique (Figure 4). L'ensemble du dispositif permet donc de ne pas à avoir à intervenir à l'intérieur de la chambre une fois les essais lancés, ceci afin d'éviter des variations thermiques et hydriques parasites.

Le suivi des variations massiques permet de corréliser les pertes de masse, et les déformations de retrait de dessiccation et de fluage de dessiccation. Pour mesurer le fluage et le retrait en endogène les éproutettes sont

protégées de la dessiccation grâce à trois couches de papier aluminium adhésif collées sur la totalité de la surface des échantillons.

Les valeurs de retrait et de fluage en endogène et en dessiccation correspondent à une valeur moyenne de trois mesures (à hygrométrie constante) et de deux mesures (à hygrométrie variable). Le coefficient de variation (écart type/valeur moyenne) est de 2,5% pour le retrait et 8.1% pour le fluage.

4. Matériaux utilisés

La formulation des Bétons Hautes Performances dérivée des précédentes études [CAM 08, LAD 11, LAD 13, VID 14]. Cette formulation est définie par l'Andra pour le stockage des déchets radioactifs en couche profonde. Elle est notamment constituée de CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP 2 NF (Lafarge, Val d'Azergues). Le Tableau 1 présente la composition retenue, dont le rapport E/C est égal à 0,43.

Tableau 1. Composition du BHP

Constituants	Masse [kg/m ³]
CEM I 52.5 N CE PM-ES-CP 2 NF (Lafarge, Val d'Azergues)	400
Sable calcaire 0/4 mm, Carrière du Boulonnais	858
Gravier calcaire 4/12, Carrière du Boulonnais	945
Superplastifiant Glénium 27, MBT	10
Eau efficace	171

A l'état frais, plusieurs caractéristiques ont été mesurées afin de vérifier que le béton respecte le cahier des charges imposé par l'Andra. Trois mesures sont faites peu après le coulage : l'affaissement au cône d'Abrams, l'air occlus et la masse volumique. Toutes les valeurs des résistances en compression uniaxiale R_c et des modules d'élasticité E pour les différentes échéances sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques à l'état frais et à l'état durci

Etat du béton	Caractéristiques mesurées	Valeurs
Etat frais	Affaissement (cm)	22,0
	Air occlus (%)	1,9%
	Masse volumique (kg.m⁻³)	2391
Etat durci	Rc et E à 7 jours	Rc=63,8 MPa E=39,3 GPa
	Rc et E à 28 jours	Rc=73,4 MPa E=42,8 GPa
	Rc et E avant mise en fluage à 95 jours	Rc=81,4 MPa E=45,9 GPa

Globalement, les résistances en compression du BHP à base de CEM I, lorsqu'il est soumis à une cure eau augmente, de manière significative jusqu'à environ 100 jours.

5. Déformation du béton à hygrométrie constante (50% HR)

La Figure 5 présente les déformations totales du béton non chargé (UCD) à humidité relative constante, du béton chargé en condition endogène (SLA) et du béton chargé en dessiccation (SLCD). La Figure 6 présente, quant à elle, les déformations totales du béton non chargé (UCD) et du béton chargé après avoir subi du retrait endogène (DLA) ou en dessiccation (DLCD). Le retrait endogène est presque nul puisque les éprouvettes sont saturées sous eau puis conservées à 20°C et isolées des échanges hydriques. Il n'y a donc pas de dépression capillaire entraînant une contraction du béton [AÏT 99].

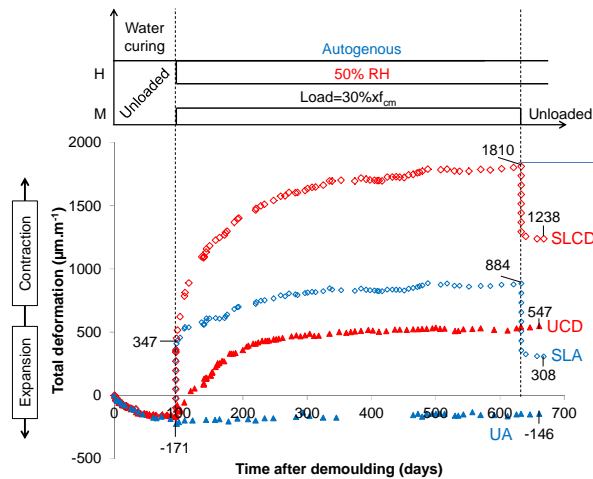


Figure 5. Déformations totales du béton en cure eau puis sous charge (SLCD et SLA) et non chargé (UCD)

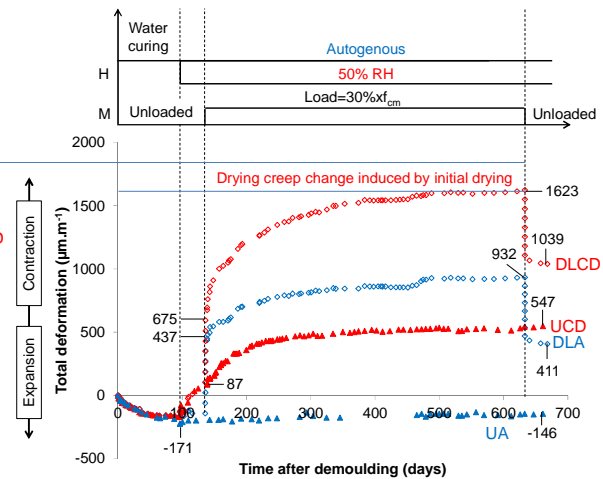


Figure 6. Déformations totales du béton en cure eau puis chargé de manière différée avec le début du séchage (DLCD et DLA) et non chargé (UCD)

Pendant la phase de cure sous eau, les éprouvettes gonflent du fait de l'apport d'eau continu. Après la période de cure, les éprouvettes SLA et SLCD sont chargées et développent une déformation élastique puis une déformation différée qui comprend une part de retrait et une part de fluage. Les éprouvettes UCD demeurent non chargées jusqu'à la fin de l'étude et se déforment uniquement sous l'effet du retrait en dessiccation. Les éprouvettes DLA et DLCD (Figure 6) sont soumises à des conditions de chargement et hydriques comparables respectivement à SLA (sans séchage) et SLD (avec séchage) à la différence majeure qu'elles ont subi du retrait préalable au chargement mécanique.

Les amplitudes de SLA et DLA sont similaires puisque, pendant la phase de retrait endogène préalable au chargement, les éprouvettes DLA, qui sont totalement hydratées, ne perdent pas de masse, et ne développent donc pas de retrait endogène. Comme attendu, les déformations totales sous charge sont plus importantes en dessiccation qu'en endogène [BEN 05, DAR 11], comme présenté dans la Figure 5. Les mêmes résultats apparaissent dans la Figure 6, où les éprouvettes subissent 43 jours de retrait endogène ou en dessiccation avant le chargement. Les échantillons en condition endogène SLA et DLA présentent des évolutions de déformations sous charge identiques, le retrait endogène préalable au chargement, quasiment nul, n'ayant aucun effet. En revanche, en condition de séchage, on constate que le retrait de dessiccation non négligeable antérieur au chargement pour DLCD entraîne une diminution de la déformation de $250 \mu\text{m.m}^{-1}$ à la fin de l'essai de fluage par rapport aux échantillons DLCD qui ont été chargé et mis en dessiccation simultanément. Ce phénomène pourrait être lié à un degré de saturation différent du béton à l'instant de la mise en fluage et donc à un fluage de dessiccation réduit pour les échantillons séchés avant chargement DLCD.

6. Déformation du béton soumis à des cycles hydriques

Les Figure 7 et Figure 8 présentent les déformations totales des échantillons soumis à deux cycles hydriques. La différence entre la Figure 7 et Figure 8 est la présence de retrait avant chargement pour la Figure 8. Dans ce dernier cas, les éprouvettes ont été séchées par paliers de 7 jours et paliers de 10% d'humidité relative entre la fin de la cure eau et le début du chargement. SLVD et DLVD représentent les éprouvettes soumises à des cycles hydriques et SLA et DLA les éprouvettes sans échange hydrique. On observe que, pendant les phases d'humidification, les éprouvettes de bétons gonflent non seulement dans le cas non chargé (UVD), mais également sous charge (SLVD et DLVD) et ce pour les deux phases d'humidification. La différence de déformations sous charge en condition de dessiccation à hygrométrie stationnaire attribuée au séchage préalable au chargement est fortement réduite, voire négligeable lors des cycles hydriques.

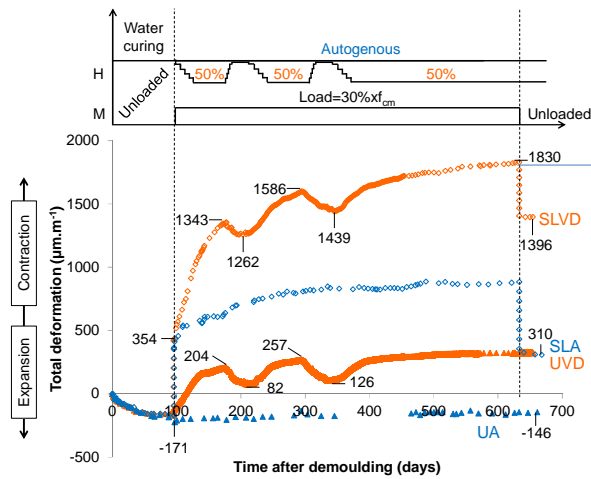


Figure 7. Déformations totales du béton en cure eau puis sous charge (SLVD et SLA) et non chargé (UVD) soumis à deux cycles hydriques

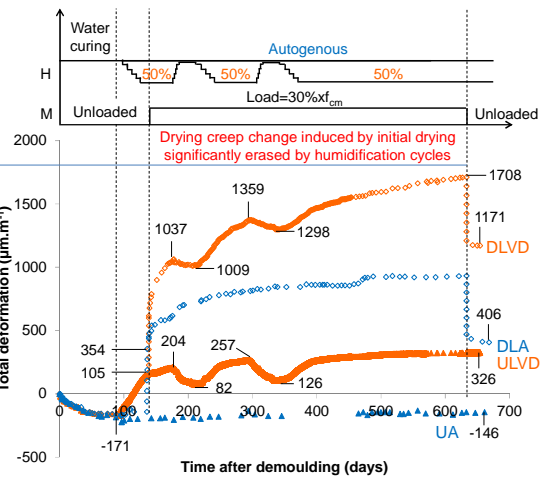


Figure 8. Déformations totales du béton en cure eau puis chargé de manière différée avec le début du séchage (DLVD et DLA) et non chargé (UVD) soumis à deux cycles hydriques

Bien que ce fluage de dessiccation puisse être réduit par un séchage et un retrait de dessiccation antérieurs au chargement, cette diminution peut être fortement atténuée par plusieurs cycles de séchage/humidification sous charge. Ce phénomène doit être pris en compte dans les modèles futurs puisqu'il entraîne une augmentation non négligeable de la déformation totale sous charge qui pourrait être préjudiciable à la tenue d'un ouvrage soumis à de telles variations hydriques.

7. Réversibilité des phénomènes sous charge indépendamment d'un séchage avant chargement

L'analyse de l'effet des cycles hydriques peut également être menée en confrontant les évolutions des déformations sous humidités relatives constantes et sous cycles hydriques, pour une même configuration avant chargement, à savoir une mise en fluage à l'issue de la cure (Figure 9), ou après un séchage et un retrait de dessiccation (Figure 10).

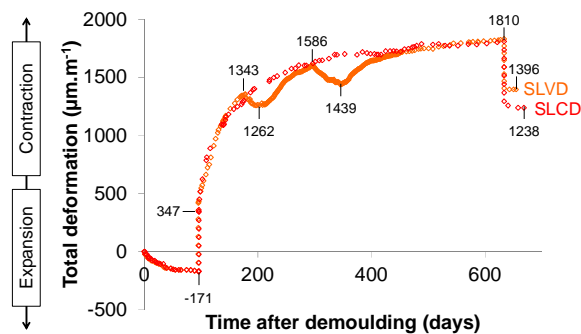


Figure 9. Déformation totale à humidité relative constante (SLCD) et variable (SLVD) pour les échantillons chargés après la cure eau

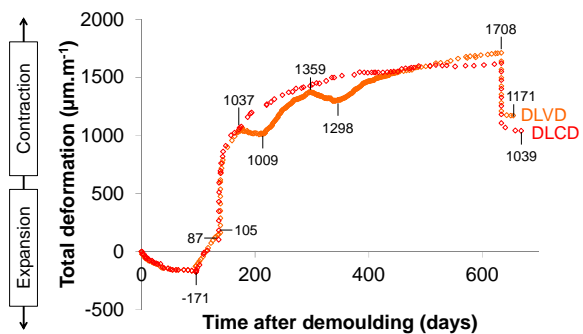


Figure 10. Déformation totale à humidité relative constante (DLCD) et variable (DLVD) pour les échantillons chargés après une période de retrait

La Figure 9 montre également la quasi-réversibilité de la déformation pendant les cycles de séchage/humidification sous charge. A long terme, les deux courbes se superposent, traduisant que sans séchage de dessiccation avant chargement, la déformation totale est indépendante de la présence ou non de cycles hydriques.

Comme expliqué précédemment pour les échantillons séchés avant le chargement (Figure 10), le retrait de dessiccation initial modifie la déformation à long terme. L'analyse de l'effet des cycles dans la configuration

d'un séchage préalable au chargement montre que l'amplitude et la vitesse de déformation à long terme des échantillons soumis à plusieurs cycles de réhumidification devient supérieur à celles en séchage à humidité constante. La réhumidification des matériaux conduit donc à restituer au matériau une capacité de déformation qu'il n'aurait pas en condition de séchage à humidité constante.

8. Conclusions

L'étude concerne l'étude du comportement différé sous charge d'un BHP soumis à des cycles hydriques et confronte les évolutions des déformations à celles mesurées à hygrométrie stationnaire. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Lorsque le béton est séché avant chargement l'amplitude de fluage en dessiccation à humidité relative constante diminue.
- Lors de la phase d'humidification d'un cycle hydrique, le béton gonfle aussi bien sans chargement mécanique, qu'avec chargement mécanique (sous 24,4MPa de compression).
- Les déformations qui se développent durant les cycles hydriques sont réversibles.
- L'application de cycles hydriques sous charge permet d'augmenter le fluage de dessiccation.

Cette dernière observation devrait conduire, lors de l'analyse du comportement à long terme du béton, à augmenter l'amplitude du fluage en dessiccation, sans quoi les effets structuraux qui en résultent (perte de précontrainte notamment) pourraient être sous-estimés.

9. Bibliographie

- [ACK 01] ACKER P., ULM F.-J., « Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements », *Nuclear Engineering and Design*, vol. 203, n°2-3, 2011, p. 143-158.
- [AÏT 99] AÏTCIN P.C., « E Demystifying autogenous shrinkage », *Concrete International*, vol. 21, n°11, 1999, p. 54-56.
- [BAZ 72] BAŽANT Z. P., « Thermodynamics of hindered adsorption and its implications for hardened cement paste and concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 2, n°1, 1972, p. 1-16.
- [BAZ 73] BAŽANT Z.P., HEMANN J.H., KOLLER H., NAJJAR L.J., « A thin-wall cement paste cylinder for creep tests at variable humidity or temperature », *Materials and Structures*, vol. 6, n°4, 2011, p. 227-281.
- [BAZ 74] BAŽANT Z. P., ASCE M., WU S. T., « Creep and shrinkage law for concrete at variable humidity », *Journal of the engineering mechanics division*, vol. 100, n°6, 1974, p. 1183-1209.
- [BAZ 75] BAŽANT Z.P., « Theory of creep and shrinkage in concrete structures: a precis of recent developments », *Mechanics Today*, vol. 2, n°8, 1975, p. 1-93.
- [BAZ 78] BAŽANT Z. P., « Solidification theory for aging creep », *Cement and Concrete Research*, vol. 8, n°5, 1978, p. 601-611.
- [BAZ 85] Bažant Z.P., Chern J. C., « Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism », *Materials and Structures*, vol. 18, n°1, 1985, p. 1-20.
- [BAZ 94] BAŽANT Z.P., Xi Y., « Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms », *Materials and Structures*, vol. 27, n°1, 1994, p. 3-14.
- [BEN 02] BENBOUDJEMA F., « Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires », *Thèse de Doctorat ENS Cachan*, 2002, 260 pages.

- [BEN 05] BENBOUDJEMA F. MEFTAH F., TORRENTI J.M., « Interaction between drying, shrinkage, creep and cracking phenomena in concrete », *Engineering Structures*, vol. 27, n°2, 2005, p. 239-250.
- [BUR 05] BURLION N., BOURGEOIS F., SHAO J. F., « Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete », *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, n°3, 2011, p. 367-379.
- [CAM 08] CAMPS G., TURATSINZE A., SELLIER A., ESCADEILLAS G., BOURBON X., « Steel-fiber-reinforcement and hydration coupled effects on concrete tensile behaviour », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, n°18, 2011, p. 5207-5216.
- [DAR 11] DARQUENNES A., KHOKHAR M.I.A., ROZIÈRE E., LOUKILI A., GRONDIN F. STAQUET S., « Early age deformations of concrete with high content of mineral additions », *Construction and Building Materials*, vol. 25, n°4, 2011, p. 1836-1847.
- [HER 69] L'Hermite R., Mamillan M., « Nouveaux résultats et récentes études sur le fluage du béton », *Materials and Structures*, vol. 2, n°1, 1969, p. 35-41.
- [LAD 11] LADAOUI W., VIDAL T, SELLIER A, BOURBON X., « Effect of a temperature change from 20 to 50°C on the basic creep of HPC and HPFRC », *Materials and Structures*, vol. 44, n°9, 2011, p. 1629-1639.
- [LAD 13] LADAOUI W., VIDAL T, SELLIER A, BOURBON X., « Analysis of interactions between damage and basic creep of HPC and HPFRC heated between 20 and 80°C », *Materials and Structures*, vol. 46, n°1-2, 2013, p. 13-23.
- [PIC 42] PICKETT G., « The effect of change in moisture-content of the creep of concrete under a sustained load », *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 13, n°4, 1942, p. 333-356.
- [PIH 74] PIHLAJAVAARA S. E., « A review of some of the main results of a research on the ageing phenomena of concrete: effect of moisture conditions on strength, shrinkage and creep of mature concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 4, n°5, 1974, p. 761-771.
- [SEL 121] SELLIER A., BUFFO-LACARRIERE L., MULTON S., VIDAL T., BOURBON X., « Nonlinear basic creep and drying creep modelling », *Strategy for Sustainable Concrete Structures (SSCS), Aix-en Provence, France, 2012.*
- [TOR 11] TORRENTI J.M., GRANGER L., DIRUY M., GENIN P., « Modélisation du retrait du béton en ambiance variable », *Revue Française de Génie Civil*, vol. 1, n°1, 2011, p. 687-698.
- [VID 14] VIDAL T., SELLIER A., LADAOUI W., BOURBON X., « Effect of temperature on the Basic Creep of High Performance Concretes heated between 20 and 80°C », *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014.
- [WIT 80] WITTMANN F. H., ROELFSTRA P. E., « Total deformation of loaded drying concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 10, n°5, 1980, p. 601-610.